

## **КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.317

### **АНАЛІЗ ПРЕЦИЗІЙНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ**

*Баженів В.Г., Лігоміна С.М., Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

*В статті наводяться основні результати аналізу впливу завад на похибку вимірювання прецизійних методів визначення швидкості ультразвуку*

#### **Вступ**

На сьогодні все більше уваги приділяється методам неруйнівного контролю, що дозволяють визначити фізико-механічні властивості ОК. Серед існуючих методів найбільш перспективним є застосування ультразвукових методів, в основу яких покладено вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі.

Існує безпосередній зв'язок між швидкістю ультразвуку та фізико-механічними властивостями об'єкту контролю, температурними, фізичними та хімічними процесами, які характеризують його. Найбільш поширеним методом визначення швидкості ультразвуку є метод прямого вимірювання часу розповсюдження ультразвукового імпульсу в сумісному режимі (луна-імпульсний метод).

$$C = \frac{2 \cdot l}{\tau},$$

де  $l$  - довжина ОК,  $\tau$  - час розповсюдження.

Для прецизійного вимірювання часу розповсюдження в неруйнівному контролі застосовують декілька груп цифрових методів: метод накладання, метод енергетичних центрів ваги, кореляційний, кореляційний з сплайн-інтерполяцією, метод нахилу фазової кривої, імпульсно-фазовий метод, нуль-пересічення.

#### **Постановка задачі**

На відміну від лабораторних умов, де вплив завад можна мінімізувати, в практичних умовах неруйнівного контролю завади вносять значний вклад у похибку вимірювань часу, зменшуючи вірогідність контролю. У відомих авторам роботах [1, 2, 3, 4] відсутній порівнювальний аналіз методів та невраховані впливи дискретизації та квантування. Тому дослідження впливу завад на похибку вимірювання часу є досить актуальним питанням.

## Методи вимірювання часу розповсюдження ультразвукового сигналу

Детальніше розглянемо методи вимірювань.

Одним з найбільш розповсюджених та простих є метод накладання. Процес вимірювань включає в себе цифровий пошук пікового значення та елемента масиву, що йому відповідає для кожного з сигналів. За виключенням амплітуди, сигнали мають схожу форму, тому критерій знаходження пікового значення є рівноцінним накладанню сигналів [1] (рис.1).

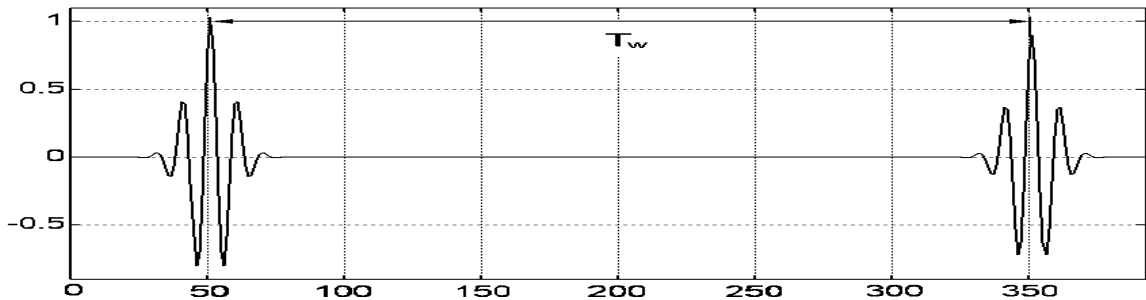


Рисунок 1 – Визначення часу затримки методом накладання

В зв'язку з тим, що значення затримок, які вимірюються в НК, може досягати 1 мс, то при високих значеннях частоти дискретизації виникає необхідність обробки чималих обсягів інформації. Щоб зменшити час обробки, виконують часову селекцію сигналів за допомогою стробування. Спочатку визначають затримку грубо, з використанням метода накладання. Далі формується симетричне, відносно знайденого максимуму, вікно для першого та другого імпульсів.

Час розповсюдження визначається сумою часу затримки між центрами вікон  $T_w$ , яке ми визначаємо методом накладання, та часу затримки  $t$  сигналів стосовно один одного у вікні (рис. 2), яке може бути уточнено іншими методами:

$$\tau = T_w + t$$

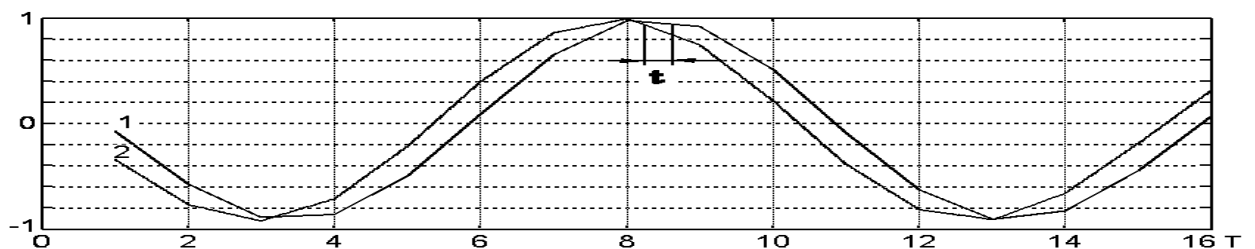


Рисунок 2 – Визначення затримки  $t$  між сигналами 1 та 2 в вікні, що стробує

Простим за реалізацією є метод нуль-пересічення. Відносно характерної точки сигналу, наприклад, максимуму, знаходять перші після неї два відліки сигналу  $U_i$  та  $U_{i+1}$ , які мають різні знаки.

Для першого сигналу

$$\Delta t_1 = (U_i T) / (U_i - U_{i+1}),$$

де  $U_i$  -  $i$ -ий відлік амплітуди прийнятого сигналу в момент часу  $t_i = i \cdot T$ ,  $T$  - часовий інтервал дискретизації вхідного сигналу.

Для другого

$$\Delta t_2 = (U_n T) / (U_n - U_{n+1})$$

$$t = t_n - t_i + (\Delta t_2 - \Delta t_1)$$

Для визначення часу можна також використати енергетичні центри ваги сигналів у часовій координаті [2].

Формула визначення положення енергетичних центрів ваги сигналів у часовій координаті записується у вигляді:

$$t_{цв} = \left( \sum_{i=0}^N (t_i U_i^2) \right) / \left( \sum_{i=0}^N U_i^2 \right),$$

де  $N$  – кількість відліків амплітуди на інтервалі дії сигналу.

Якщо обчислені значення часових положень центрів ваги для першого і другого сигналів, то можна визначити часову відстань між ними як:

$$t = t_{цв2} - t_{цв1}, \quad (7)$$

де  $t_{цв1}, t_{цв2}$  – положення центрів ваги першого і другого сигналів.

Для вимірювань часу розповсюдження  $t$  можна також скористатися кореляційною функцією [1].

Найбільш часто використовують функцію крос-кореляції (рис.3). Для дискретної реалізації

$$R_{xy}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) y(n-t), \quad (8)$$

де  $x(n)$ ,  $y(n)$  - сигнали 1 та 2,  $N$  - кількість точок на інтервалі дослідження,  $t$  - затримка між сигналами.

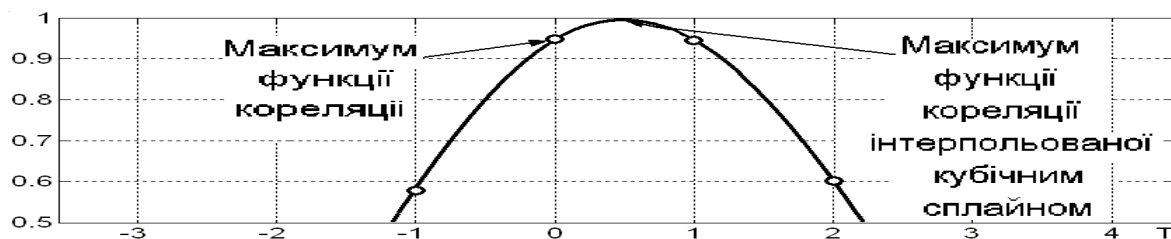


Рисунок 3 - дискретна кореляційна функція, інтерпольована кубічним сплайном функція кореляції

Точність визначення часу затримки між сигналами обмежується періодом частоти дискретизації сигналів. З метою збільшення роздільної здатності може застосовуватися інтерполяція. Так, в роботі [3] збільшують роздільну здатність на порядок, використовуючи кубічну інтерполяцію (рис.3).

Розглянемо метод нахилу фазової характеристики. Для кожного з сигналів 1 та 2 можна, скориставшись швидким перетворенням Фур'є, отримати амплітудний та фазовий спектри  $\theta_1(f)$  та:

$$\theta_1(f) = \arctg \frac{\text{Im}(S_1(f))}{\text{Re}(S_1(f))}, \theta_2(f) = \arctg \frac{\text{Im}(S_2(f))}{\text{Re}(S_2(f))}, \quad (9)$$

де  $\text{Re}(S_1(f)), \text{Re}(S_2(f))$  - дійсна та  $\text{Im}(S_1(f)), \text{Im}(S_2(f))$  - уявна частини комплексних спектрів  $S_1(f), S_2(f)$  першого та другого сигналів,  $f$  - частота.

Тоді повний фазовий спектр рознесених в часі сигналів обчислюється згідно виразу:

$$\theta(f) = \theta_2(f) - \theta_1(f), \quad (10)$$

а затримка визначається таким чином:

$$t(f) = \theta(f) / (2\pi f) \quad (11)$$

Для зменшення впливу похибок визначення фазового спектру на визначення часу розповсюдження виконують лінійну регресію фазового спектру [4].

В імпульсно-фазовому методі фаза імпульсу визначається за допомогою ортогонального методу вимірювання фазового зсуву [5].

$$\varphi = \arctg(U_c / U_s) \quad (12)$$

$$U_c = \sum_{n=0}^{K \cdot p - 1} U_n \cos(2\pi f n T), U_s = \sum_{n=0}^{K \cdot p - 1} U_n \sin(2\pi f n T), \quad (13,14)$$

де  $K$  - кількість періодів,  $p$  - кількість вибірок на період

### Методика комп'ютерного моделювання

З метою вирішення поставленої мети в середовищі Matlab було створено програму, блок-схему якої наведено на рис. 4.

Недоліком імпульсно-фазового методу є можливість появи неоднозначності вимірювань, якщо час затримки перевищує період сигналу. Для усунення неоднозначності пропонується використати кореляційний метод. Використання комбінації методів дозволяє, крім підвищення точності методу, визначати фазовий час затримки (фазову швидкість).

Для моделювання було використано математичну модель п'єзоелектричного перетворювача (ПЄП) (рис. 5), запроваджену в роботі [6] з наступними параметрами (табл.1) без електричних узгоджуючих ланцюгів.

Таблиця 1. Параметри ПЄП

Назва шару	Матеріал	Акустичний імпеданс	Товщина
Демпфер	Суміш епоксидної смоли та порошку вольфраму	$1 \cdot 10^7$ Па·с/м	-
П'єзопластина	ЦТС-19	$3,106 \cdot 10^7$ Па·с/м	$\lambda/2$
Перехідний шар	Дюралюміній	$1,792 \cdot 10^7$ Па·с/м	$\lambda/4$

Як середовище використовували сталь ( $Z=4.692 \cdot 10^7$  Па·с/м), резонансна частота ПЄП дорівнювала  $f_p=9.69$  МГц.

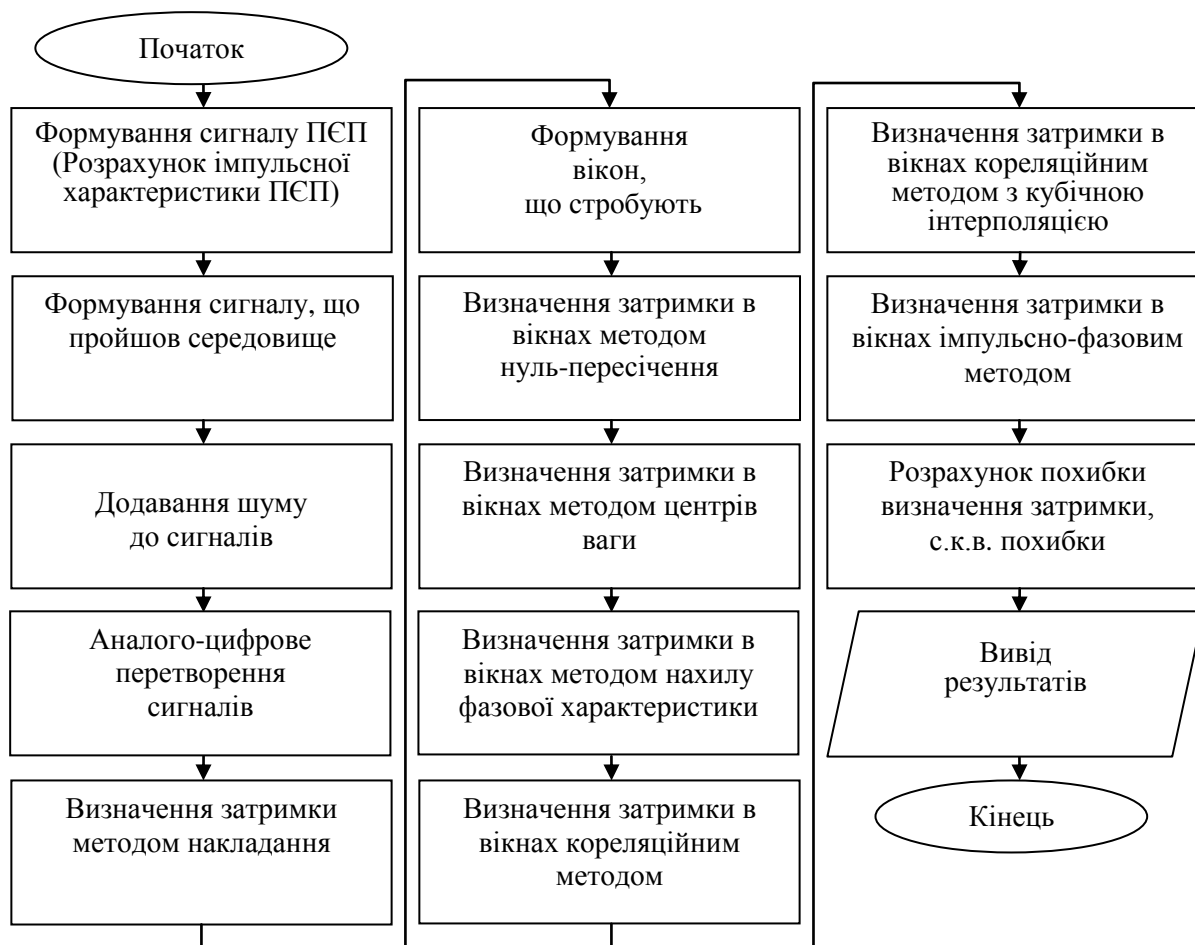


Рисунок 4 – Блок-схема програми моделювання.

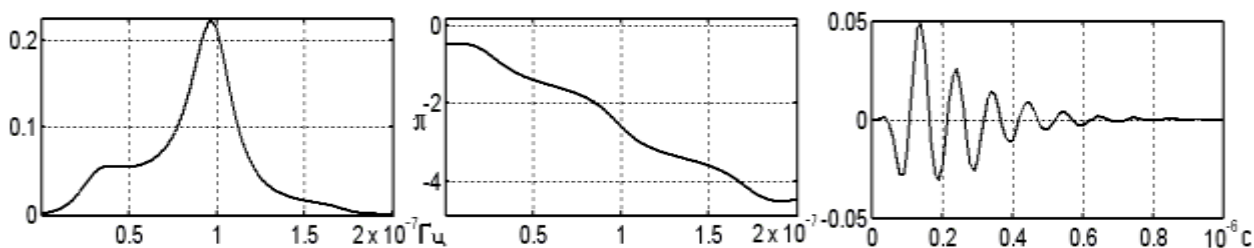


Рисунок 5 – АЧХ, ФЧХ та імпульсна характеристики ПСП.

Частоту дискретизації 8-розрядного АЦП було обрано 40 та 100 МГц. Затримка формувалась випадково від 10 до 100 мкс за рівномірним законом розподілу.

### Обговорення результатів досліджень

В результаті проведеного моделювання було отримано залежності с.к.в для двох частот дискретизації 40 і 100 МГц. На рис.6 приведені результати моделювання. Найбільш точними, при відношенні сигнал-шум менше 40дБ, є кореляційні методи.

При відношенні сигнал-шум, що перевищує 40дБ, кореляційний метод з кубичною інтерполяцією та імпульсно-фазовий методи дають приблизно однакову похибку вимірювання. Зміна частоти дискретизації в значній мірі впливає на с.к.в. похибки вимірювань для більшості методів, крім імпульсно-фазового (рис. 7).

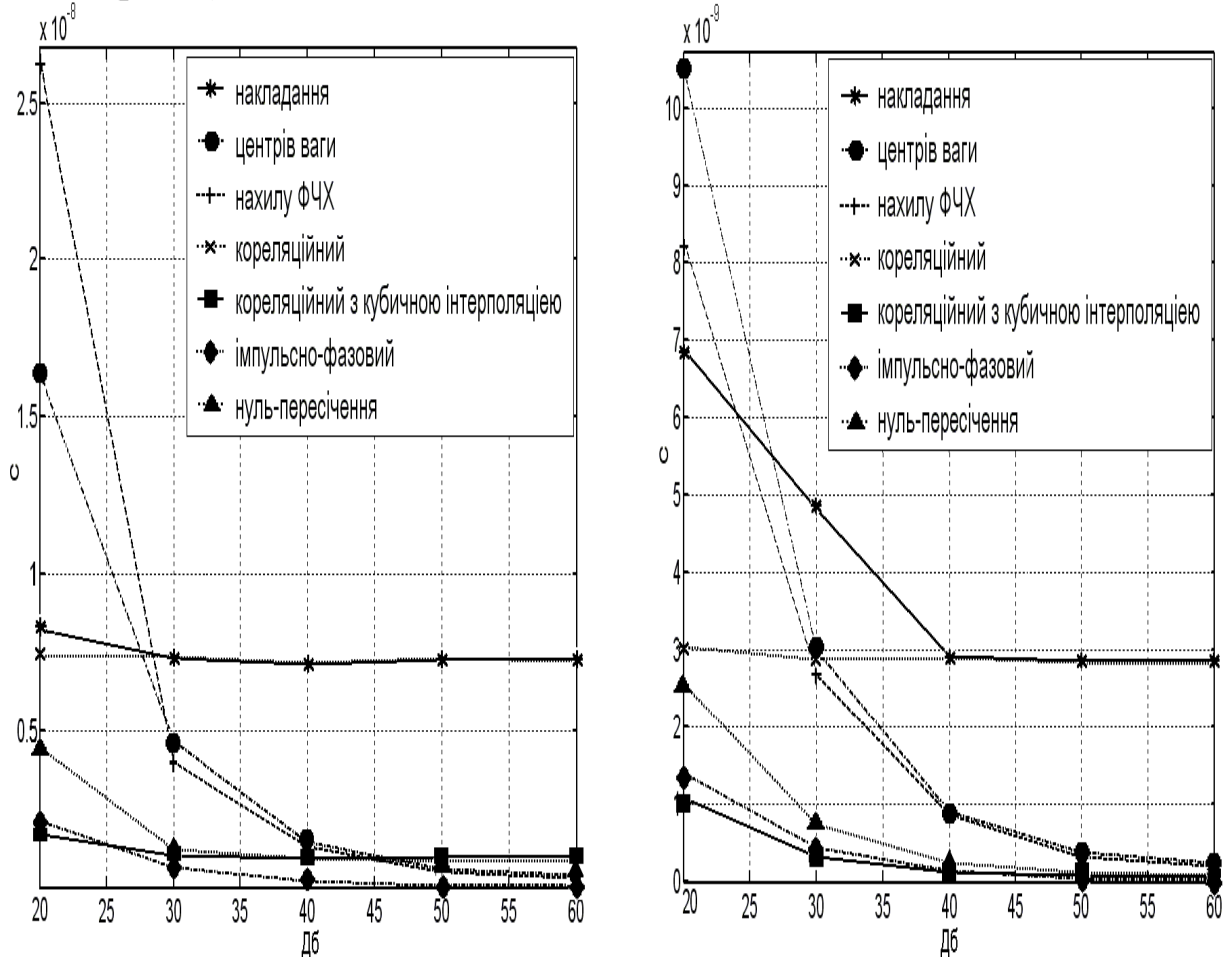


Рисунок 6 – Залежності с.к.в. похибки вимірювань від відношення сигнал-шум для частот дискретизації 40 та 100 МГц.

Результати моделювання показали, що зменшення частоти дискретизації в 2.5 рази практично не вплинуло на значення с.к.в. похибки визначення часу затримки імпульсно-фазовим методом.

### Висновки

Отримані результати моделювання дозволяють з наведених графіків дати оцінку с.к.в. похибки визначення часу затримки в залежності від відношення сигнал-шум та частоти дискретизації.

Проведений аналіз показав, що найбільшу завадостійкість мають кореляційні методи.

Отримані дані також говорять про перспективність подальшої розробки імпульсно-фазового методу, який дає змогу, незалежно від форми фазової

характеристики середовища, визначати фазову швидкість.

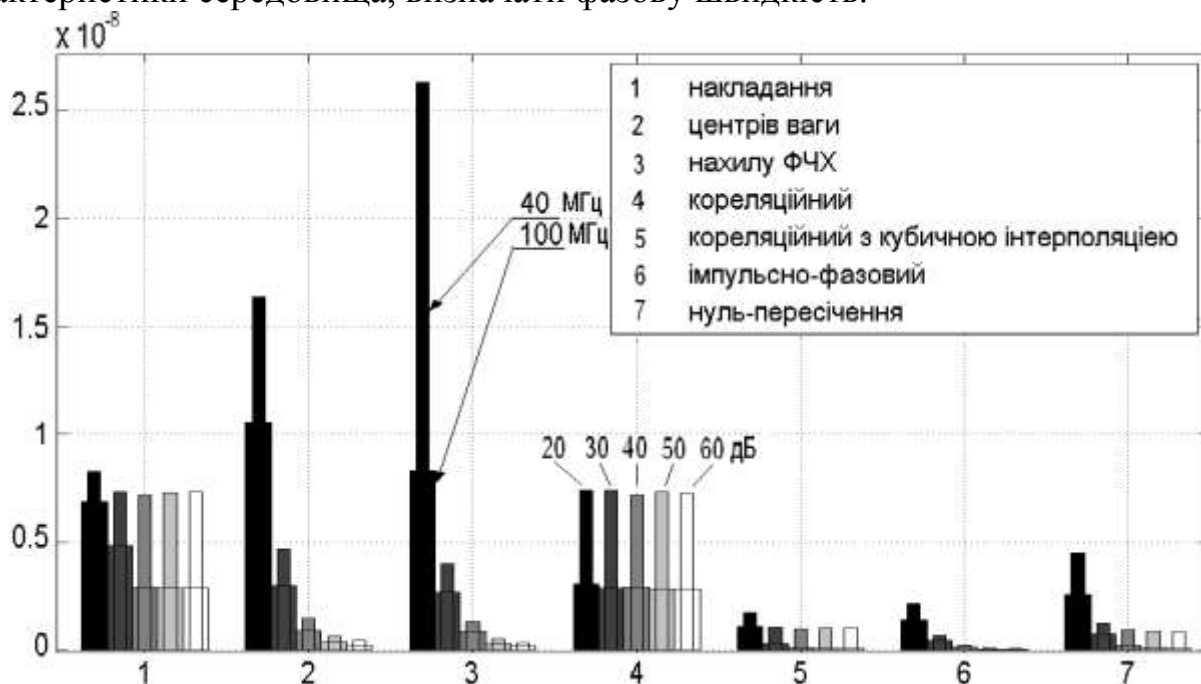


Рисунок 7 - Стовбчаста діаграма с.к.в. похибки визначення затримки для частот дискретизації 40 і 100 МГц.

### Література

1. Вилков А.Б. Физические аспекты акустического контроля. Международный центр научной и технической информации, Институт машиноведения им.А.А. Благонравова АН СССР. -М., 1992. -269 с
2. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Кришан М. Цифровая обработка сигналов при определении акустических свойств материалов // Вісник КМУЦА. -1999. -№ 2. -С.133-138.
3. Rao V.P.C., Jayakumar T., Bhattacharyja D.K. and Baldev Raj. New methodology for precise ultrasonic velocity measurement and its applications // J. Pure App. Ultrason. -1993. -Vol.15. -P.53-59.
4. Hull D., Kautz H. and A.Vary. Measurement of ultrasonic velocity using Phase-Slope and Cross-correlation Methods. Materials Evaluation. -1985. -Vol.43. -№11. -P.1455-1460.
5. Баженов В.Г. Лігоміна С.М. Багатошкільний метод визначення фазової швидкості ультразвуку. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. -2001. -№ 4. -С.40-41.
6. Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю.. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. -Вильнюс, Минтис, 1974. -258 с.

Баженов В.Г., Лигоміна С.Н. **Анализ прецизионных методов измерения скорости ультразвука**

В статье приводятся основные результаты анализа влияния помех на погрешность измерения прецизионных методов определения скорости ультразвука.

Bazhenov V.G., Ligomina S.N. **Analysis of precise methods of ultrasound velocity measuring**

The main results of analysis of noises effects for errors of precise methods of ultrasound velocity measuring are considered in the article.

Надійшла до редакції  
12 травня 2004 року